

**МЕТОД УПРАВЛІННЯ АВТОНОМНИМИ ІНВЕРТОРАМИ НАПРУГИ
СУДНОВИХ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВОК**

У статті доведено, що підвищення якісних характеристик перетворювачів енергії з ланкою постійного струму з багаторазовою комутацією та широтно-імпульсним регулюванням є актуальним завданням. При цьому виникає протиріччя між вимогою мінімізації втрат в асинхронних двигунах та мінімізацією втрат у перетворювачах частоти, що вимагає, з одного боку, підвищення, а, з іншого, – зменшення несучої частоти. Досягнення необхідних техніко-економічних показників вторинних перетворювачів енергії, як перетворювачів з ланкою постійного струму, вимагає використання багаторазової комутації з різними методами модуляції у поєднанні з широтно-імпульсним регулюванням, а також ступінчастих принципів перетворення енергії. Отже підвищення якісних характеристик перетворювачів енергії з ланкою постійного струму з багаторазовою комутацією та широтно-імпульсним регулюванням є актуальним завданням. Метою дослідження є розроблення методу управління автономними інверторами напруги суднових електроенергетичних установок. Проведене дослідження свідчить, що розвиток методів керування АІН у системах ПЧ-АД пов'язаний із застосуванням різних видів ШІМ, які вимагають лише модифікації алгоритмів управління, орієнтованих на пряме мікропроцесорне управління і зниження необхідної частоти комутації. Безпосереднє мікропроцесорне управління електроприводами відкриває значні перспективи для розвитку багатофазних силових систем, оскільки дає змогу організувати пов'язане управління на великій кількості фаз, обмежене тільки ресурсами та кількістю каналів управління конкретної мікропроцесорної плати. З урахуванням дроблення потужності за фазами з'являється можливість застосування високошвидкісних ключів, що ще більше розширює можливості застосування складних законів управління в перехідних режимах роботи електроприводу суднових електроенергетичних установок.

Ключові слова: автономні інвертори напруги, асинхронні суднові двигуни, електроенергетика, мікропроцесорна техніка, морський транспорт, силова електроніка, суднові двигуни, електроенергетичні установки.

O. Tymoshchuk, Y. Shapran. Control method for autonomous voltage inverters of ship power plants. The article proves that improving the quality characteristics of energy converters with a DC link with multiple switching and pulse-width regulation is an urgent task. In this case, a contradiction arises between the requirement of minimizing losses in asynchronous motors and minimizing losses in frequency converters, which requires, on the one hand, an increase, and, on the other, a decrease in the carrier frequency. Achieving the necessary technical and economic indicators of secondary energy converters, as converters with a DC link, requires the use of multiple switching with various modulation methods in combination with pulse-width regulation, as well as step-wise principles of energy conversion. Therefore, improving the quality characteristics of energy converters with a DC link with multiple switching and pulse-width regulation is an urgent task. The purpose of the study is to develop a method for controlling autonomous voltage inverters of ship electrical power plants. The study shows that the development of control methods for AVI in AC-DC systems is associated with the use of various types of PWM, which require only modification of control algorithms focused on direct microprocessor control and reducing the

¹ д-р техн. наук, професор, Державний університет інфраструктури та технологій, м. Київ, ORCID: 0000-0003-3684-6182, mnielena7@gmail.com

² канд. техн. наук, Державний університет інфраструктури та технологій, м. Київ, ORCID: 0000-0002-0229-2428, olilia2007@ukr.net

required switching frequency. Direct microprocessor control of electric drives opens up significant prospects for the development of multiphase power systems, since it allows organizing connected control over a large number of phases, limited only by the resources and number of control channels of a specific microprocessor board. Taking into account the splitting of power by phases, the possibility of using high-speed switches appears, which further expands the possibilities of applying complex control laws in transient operating modes of the electric drive of ship electrical power plants.

Keywords: *autonomous voltage inverters, asynchronous marine engines, electric power, microprocessor technology, marine transport, power electronics, marine engines.*

Постановка проблеми. Розвиток сучасної елементної бази та зростання швидкодії мікропроцесорної техніки створили можливість застосування складних законів модуляції в системах з імпульсно-модуляційним перетворенням енергії в роботі як загальносуднового обладнання, так і для забезпечення силових агрегатів руху суден. Досягнення необхідних техніко-економічних показників вторинних перетворювачів енергії, як перетворювачів з ланкою постійного струму, вимагає використання багаторазової комутації з різними методами модуляції у поєднанні з широтно-імпульсним регулюванням, а також ступінчастих принципів перетворення енергії. Отже підвищення якісних характеристик перетворювачів енергії з ланкою постійного струму з багаторазовою комутацією та широтно-імпульсним регулюванням є актуальним завданням.

Пристрої управління перетворювачів частоти мають реалізовувати метод, який забезпечив реалізацію двох основних вимог, що висуваються до системи перетворювач частоти (ПЧ) – асинхронний двигун (АД):

- мінімізація втрат у АД та мінімізація пульсацій моменту, визначених впливом полів першої та вищих гармонік;

- мінімізація втрат в елементах перетворення.

Такі вимоги суперечливі, оскільки для удосконалення роботи АД необхідно підвищувати несучу частоту, а для зменшення втрат у ПЧ її слід зменшувати. Також двосторонній енергетичний зв'язок вимагає додаткових перемикачів у ПЧ. Дана ситуація вимагає розроблення відповідних методів управління.

Аналіз останніх досліджень. На сьогоднішній день спостерігається тенденція переходу від виконавчих елементів постійного струму до виконавчих елементів змінного струму, а також використання прямого мікропроцесорного управління силовими напівпровідниковими перетворювачами [1- 4].

Для асинхронних двигунів, які набули найбільшого поширення і споживають близько шістдесяти відсотків вироблюваної енергії, використовують як скалярні, так і векторні методи керування [5-7]. Найпоширенішим способом реалізації частотного керування асинхронними двигунами є використання перетворювачів частоти з явно вираженою ланкою постійного струму [8].

Мета статті є розроблення методу управління автономними інверторами напруги суднових електроенергетичних установок.

Виклад основного матеріалу. Всі методи управління автономними інверторами напруги (АІН) у системі ПЧ-АД мають відповідати єдиним вимогам, які полягають у можливості глибокого регулювання частоти основної гармоніки та її амплітуди, розділення робочої смуги частот і смуги, в якій розташовуються небажані складові.

Вимоги до якості вихідної напруги АІН установок, асинхронного електроприводу та електричних мереж нормуються [9]. Експлуатаційні характеристики АІН характеризуються [1]:

- коефіцієнтом перетворення за напругою K_U , під яким розуміється відношення максимально можливого діючого значення основної гармоніки вихідної напруги АІН до середньої напруги в ланцюзі постійного струму;

- якістю вихідної напруги, що визначається коефіцієнтом гармонік (K_T) для низькочастотної та еквівалентної комбінаційної гармоніки (U_E), а також коефіцієнтом компенсаційних гармонік (K_{KT}) для високочастотної частини частотного спектра;

- формою кривої споживаного струму з ланцюга постійного струму.

Вихідна напруга АІН представляється у вигляді:

$$u_n(t) = F_k(t)u_d(t), \quad (1)$$

де $F_k(t)$ – схемна комутаційна функція.

Отже, завдання управління якістю вихідної напруги АІН зводиться до формування $F_k(t)$, яка визначається обраним законом управління і видом широтно-імпульсної модуляції (ШІМ). Діапазон потужностей у різних системах ПЧ-АД достатньо широкий й становить від 0,4 до 500 кВт.

Швидкість обертання таких систем регулюється в діапазоні 0-400 Гц. Одним із чинників підвищення якості вихідної напруги є вибір частоти комутації силових ключів інвертора. Принципово підвищення частоти можливе до 30 кГц (використання надпровідних IGBT-модулів), що знижує амплітуду пульсацій трифазного струму обмотки статора і пов'язані з ними шуми і вібрації в АД у звуковому спектрі частот. Зниження часу увімкнення і вимкнення ключів (підвищення частоти комутації) нижче 1 мкс підвищує нелінійність процесу перетворення. Це пов'язано зі зменшенням співвідношення періоду ШІМ та «мертвого часу» (зони некеруваності ключа).

Водночас підвищення частоти комутації понад 5-10 кГц спричиняє різке збільшення теплових навантажень на ключі в статичних та динамічних режимах. Так, при збільшенні частоти комутації до 20 кГц теплові втрати зростають у 5-10 разів, що викликає зниження струмових навантажень у відповідному співвідношенні і призводить до початкового збільшення габаритів перетворювача та ціни.

Використання прямого мікропроцесорного управління дає змогу здійснити вибір значення $F_k(t)$ та необхідної частоти комутації залежно від швидкості обертання ротора АД. Загальна тенденція полягає в переході від широтно-імпульсного регулювання (ШІР) у різних модифікаціях, що використовуються у діапазоні високих швидкостей обертання, до ШІМ на низьких швидкостях обертання [6]. Для отримання високої якості вихідної напруги використовують три види трифазної ШІМ [6, 10]:

- класична ШІМ за синусоїдальним законом;
- ШІМ із попередньою модуляцією третьою гармонікою вихідної частоти (квазівекторна ШІМ);
- векторна (або симплексна) ШІМ.

Квазівекторна та векторна ШІМ забезпечують підвищення K_U , порівняно з класичною трифазною синусоїдальною ШІМ, приблизно на 15% [5]. Реалізація векторної ШІМ орієнтована на використання мікропроцесорних систем управління [3]. В основі технічної реалізації класичної трифазної та ШІМ із передмодуляцією полягає принцип вертикального управління з використанням ШІМ другого роду та двостороннього сигналу розгортки трикутної форми.

$$r(t) = -\frac{2R_m}{\pi} \arcsin \left[\sin \left(2 \cdot N \cdot \omega \cdot t - \frac{\pi}{2} \right) \right], \quad (2)$$

де N – кількість імпульсів управління на півперіоді інвертуємої напруги $T = 2 \cdot \pi \cdot \omega$ кратні трьом; R_m – максимальне значення сигналу розгортки.

Моменти вмикання ($t_{вн}$) та вимикання ($t_{вимн}$) ключових елементів (рис. 1) визначаються шляхом розв'язання трансцендентних рівнянь:

- класична ШІМ за синусоїдальним законом:

$$\begin{aligned} r(t) &= V_{yA}(t); r(t) = V_{yB}(t); r(t) = V_{yC}(t); V_{yA}(t) = K_m \sin \omega t; \\ V_{yB}(t) &= K_m \sin \left(\omega t - \frac{2\pi}{3} \right); V_{yC}(t) = K_m \sin \left(\omega t - \frac{4\pi}{3} \right); K_m = \overline{0; 1}; \end{aligned} \quad (3)$$

- ШІМ із попередньою модуляцією:

$$\begin{aligned} V_{yA}(t) &= K_m (\sin \omega t + 0,13 \sin 3\omega t); \\ V_{yB}(t) &= K_m \left[\sin \left(\omega t - \frac{2\pi}{3} \right) + 0,13 \sin 3\omega t \right]; \\ V_{yC}(t) &= K_m \sin \left[\left(\omega t - \frac{4\pi}{3} \right) + 0,13 \sin 3\omega t \right], \end{aligned} \quad (4)$$

де $V_{yA}(t)$, $V_{yB}(t)$, $V_{yC}(t)$ – сигнали управління для фаз A, B, C відповідно; K_m – коефіцієнт модуляції.

У практичній складовій перемикання ключових елементів ключового блока здійснюється за допомогою ШІМ модуляторів другого роду у відповідності з правилами: $m_{A,B,C} = if[V_{yA,B,C}(t) > r(t), 1, 0]$, що призводить до нерівності відрізків часу $c_{1h}T_h$ та $c_{2h}T_h$, як це наведено на рис. 1.

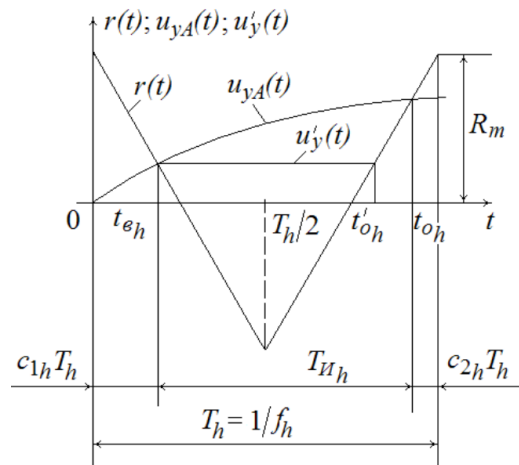


Рис. 1 – Двополярна двостороння широтно-імпульсна модуляція

Така нерівність ($c_{1h}T_h \neq c_{2h}T_h$) негативно впливає на якість гармонічного складу вихідної напруги. З метою усунення даного недоліку необхідно зменшити значення T_h , тобто збільшити значення несучої частоти. Для достатньо високих значень f_h синусоїдальний управляючий сигнал на відрізку часу T_h замінюється прямокутно-ступінчастим $u'(t)$ (див. рис. 1). У такому випадку $t'_{oh} \rightarrow t_{oh}$; $c_{1h}T_h \rightarrow c_{2h}T_h$, а залежність для K_U при $V_{ym} \leq R_m$ прийме вигляд:

$$K_U \approx 0,5K_m, \quad (5)$$

де V_{ym} – максимальне значення сигналу управління.

Для однофазних АІН доцільне використання однополярних сигналів розгортки з двосторонньою або з модуляцією за фронтом і зрізом, які забезпечують менші значення амплітуди еквівалентної комбінаційної гармоніки (U_E) і коефіцієнта компенсаційних гармонік ($K_{КГ}$) порівняно з двополярною [7].

При використанні синусоїдальної двосторонньої модуляції (рис. 2), яка ефективніше від модуляції за зрізом та фронтом за рахунок більшої кількості інформаційних точок, моменти часу t_{Bh} та t_{Oh} визначаються шляхом розв'язання трансцендентного рівняння:

$$\begin{aligned} V_y &= r(t); V_y = |K_m \sin \omega t|, \\ r(t) &= -\frac{2R_m}{\pi} \arcsin \left[\sin \left(2N\omega t - \frac{\pi}{2} \right) \right] + \frac{R_m}{2}; \end{aligned} \quad (6)$$

практична реалізація якого здійснюється за допомогою ШІМ модулятора другого роду: $m = if[V_y(t) > r(t), 1, 0]$.

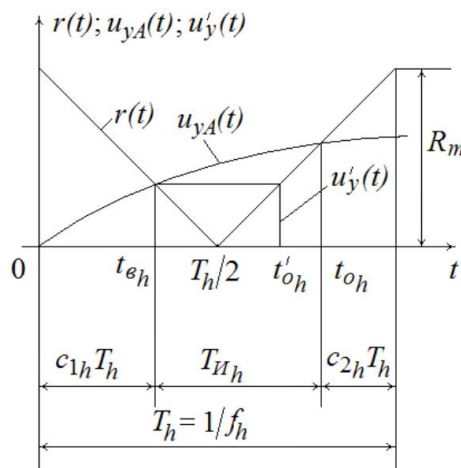


Рис. 2 – Однополярна двостороння широтно-імпульсна модуляція

Значення першої гармоніки вихідної напруги для досить високих f_h визначається за формулою:

$$U_1 \approx K_m U_d. \quad (7)$$

Збільшення значення U_1 , при збереженні якісних характеристик гармонійного складу вихідної напруги, можливе шляхом використання ШІМ із трапецеїдальним і прямокутно-ступінчастим законами керування, а також за рахунок синтезу модуляції (ШІМ із передмодуляцією).

Значення першої гармоніки, при даних видах модуляції, зростає до значень (5-15)% від U_d .

Висновки

Проведене дослідження свідчить, що розвиток методів керування АІН у системах ПЧ-АД пов'язаний із застосуванням різних видів ШІМ, які вимагають лише модифікації алгоритмів управління, орієнтованих на пряме мікропроцесорне управління і зниження необхідної частоти комутації.

Безпосереднє мікропроцесорне управління електроприводами відкриває значні перспективи для розвитку багатофазних силових систем, оскільки дає змогу організувати пов'язане управління на великій кількості фаз, обмежене тільки ресурсами та кількістю каналів управління конкретної мікропроцесорної плати. З урахуванням дроблення потужності за фазами з'являється можливість застосування високошвидкісних ключів, що ще більше розширює можливості застосування складних законів управління в перехідних режимах роботи електропривода суднових електроенергетичних установок.

Перелік використаних джерел:

1. Чехет Э. М., Соболев В. Н., Михальский В. М. Тенденции развития матричных преобразователей для асинхронного электропривода. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Тематичний випуск: Проблеми автоматизованого електропривода*. Харків : НТУ «ХПІ», 2005. № 45. С. 32-37.
2. Голубев В. В. Импульсное преобразование переменного напряжения. Київ : Наукова думка, 2014. 247 с.
3. Транзисторные преобразователи с улучшенной электромагнитной совместимостью / Шидловский А. К., Козлов А. В., Комаров Н. С., Москаленко Г. А. Київ : Наукова думка, 2003. 271 с.
4. Corzine K.A. Operation and Design of Multilevel Inverters. University of Missouri – Rolla, 2005. 79 p.
5. Денисов Ю.А. Стабилизаторы постоянного напряжения с широтно-импульсными и частотно-импульсными квазирезонансными преобразователями. Київ : Изд. Института электродинамики НАН Украины, 2001. 146 с.
6. Пивняк Г. Г., Волков А. В. Современные частотно-регулируемые асинхронные электроприводы с широтно-импульсной модуляцией: монография. Днепропетровск : НГУ, 2006. 470 с.
7. Bimal K. Bose. Power Electronics and Motor Drives. Advances and Trends. 2006. 917 p.
8. Носенко В. М. Судовые энергетические установки. Николаев : ФЛН, 2013. 443 с.
9. ДСТУ EN 50160-2014. Характеристики напруги електропостачання в електричних мережах загального призначення. [Чинний від 2014-10-01]. Київ : Мінекономрозвитку України, 2014. 32 с.
10. Островерхов М. Я., Сенько В. І., Чибеліс В. І. Імпульсні перетворювачі стабілізованої напруги. Київ : Ліра, 2020. 242 с.

References:

1. E.M. Chekhet, V.N. Sobolev, and V.M. Mykhalskyi, «Tendentsyy razvytyia matrychnikh preobrazovatelei dlia asynkhronnoho elektropyvoda» [«Trends in the development of matrix converters for asynchronous electric drives»], *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «KhPI». Tematychnyi vypusk: Problemy avtomatyzovanoho elektropyvoda* – *Bulletin of the National Technical University «KhPI». Thematic issue: Problems of automated electrodrive*, № 45, pp. 32-37, 2005. (Rus.)
2. V.V. Holubev, *Ympulsnoe preobrazovanye peremennoho napriazheniya* [Pulse conversion of alternating voltage]. Kyiv, Ukraine: Naukova dumka Publ., 2014. (Rus.)

3. A.K. Shydlovskiy, A.V. Kozlov, N.S. Komarov, and H.A. Moskalenko, *Tranzystornie preobrazovateli s uluchshennoi elektromahnytoi sovmestymosti* [Transistor converters with improved electromagnetic compatibility]. Kyiv, Ukraine: Naukova dumka Publ., 2003. (Rus.)
4. K.A. Corzine, *Operation and Design of Multilevel Inverters*. University of Missouri – Rolla, 2005.
5. Yu.A. Denysov, *Stabylyzatori postoiannoho napriazheniya s shyrotno-ympulsnyimi y chastotno-ympulsnyimi kvazyrezonansnyimi preobrazovateliami* [Constant voltage stabilizers with pulse-width and pulse-frequency quasi-resonant converters]. Kyiv, Ukraine: Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine Publ., 2001. (Rus.)
6. H.H. Pyvniak, and A.V. Volkov, *Sovremennye chastotno-rehulyruemie asynkhronnye elektropryvody s shyrotno-ympulsnoi modulyatsiei: monohrafiya* [Modern frequency-controlled asynchronous electric drives with pulse-width modulation: monograph]. Dnepropetrovsk, Ukraine: NHU Publ., 2006. (Rus.)
7. K. Bimal Bose. *Power Electronics and Motor Drives. Advances and Trends*. 2006.
8. V.M. Nosenko, *Sudovie enerhetycheskye ustanovky* [Marine power plants]. Nikolaev, Ukraine: FLN Publ., 2013. (Rus.)
9. Kharakterystyky napruhy elektropostachannia v elektrychnykh merezhakh zahalnoho pryznachennia [Characteristics of power supply voltage in general purpose electrical networks], State standart EN 50160-2014, Ministry of Economic Development of Ukraine, 2014. (Ukr.)
10. M.Ya. Ostroverkhov, V.I. Senko, and V.I. Chybelis, *Impulsni peretvoriuvachi stabilizovanoi napruhy* [Pulse converters of stabilized voltage]. Kyiv, Ukraine: Lira Publ., 2020. 242 c. (Ukr.)

Стаття надійшла 17.07.2024

Стаття прийнята 13.08.2024